

ПОВЫШЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ АКТИВИЗИРОВАНИЕМ ДИСЛОКАЦИОННОЙ МОДЕЛИ УПРОЧНЕНИЯ ДИСПЕРСНЫМИ ФАЗАМИ

Мочалина Н. С., Дробяз А.А.

Руководитель – профессор, д.т.н. Тушинский Л. И.

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск,
e-mail: kapriz.ru@mail.ru

Реальную прочность промышленных сплавов целесообразно оценивать рассматривая противоречие между прочностными свойствами материала и показателями трещиностойкости, которые вместе и взаимозависимо определяют конструктивную прочность материала. Так, приведённая на рисунке 1 качественная диаграмма представляет собой тройную зависимость: предел текучести (σ_T) – вязкость разрушения (K_{IC}) – структура в различно упрочнённых сплавах. Условная точка X делит диаграмму на две области. Первая область (I)- высокой надежности, вторая - повышенной хрупкости. Если реальный сплав в соответствии со своим структурным состоянием располагается в области I его служба безопасна, так как всякие случайные перегрузки будут сниматься активной пластической деформацией в связи с низкими значениями σ_T и высокими значениями K_{IC} . Если же сплав сильно упрочнен (созданы активные препятствия движущимся дислокациям), то значительно вырос σ_T и снизился показатель вязкости разрушения K_{IC} (область II). В этих условиях всякий пик внешней нагрузки сначала достигает критического значения K_{IC} и создаются благоприятные условия для развития хрупкого разрушения.

Рис. 1. Качественная диаграмма тройной зависимости

В связи с этим, актуальная задача для эффективного упрочнения металлических сплавов заключается в поиске возможных путей сдвига данной точки X на диаграмме конструктивной прочности вправо (X') и создании таких структур материала, которые бы повысили уровень трещиностойкости, не снижая прочностных свойств сплава.

Взаимосвязь между структурой материала, его прочностью и трещиностойкостью устанавливает главное уравнение структурной теории конструктивной прочности. Оно включает 5 наиболее важных дислокационно-дисклинационных моделей упрочнения материала:

$$\sigma_T, K_{IC} = (\sigma_n, \sigma_d, \sigma_p, \sigma_\phi, \sigma_z),$$

где σ_n – сила Пайерлса-Наббарро, σ_d – упрочнение взаимодействием дислокаций, σ_p – упрочнение растворенными чужеродными атомами, σ_ϕ – упрочнение дисперсными фазами, зонами, кластерами, σ_z – упрочнение структурными барьерами (границами зерен, фаз).

Из них, как наиболее эффективные дислокационно-дислокационные модели упрочнения, повышающие конструктивную прочность материала выделяются: $\sigma_{д.п.я.}$, σ_{ϕ} , σ_3 .

Основываясь на данных выводах нами предложена технология упрочнения конструкционных материалов, основанная на регулируемом термопластическом упрочнении (РТПУ). Проводимая нами обработка была направлена на активизирование действия благоприятных дислокационных механизмов упрочнения и снижение влияния неблагоприятных механизмов.

Основным материалом исследования выбрана сталь У8. Для активизации механизма упрочнения σ_{ϕ} было решено добавить в модельную сталь ниобий в количестве 0,1 %. Данное количество легирующего элемента достаточно для образования карбидов, но не критично для снижения трещиностойкости.

Для активизации механизма σ_3 в закалённой структуре перед закалкой было решено провести термопластическую обработку по следующим режимам:

1. Нагрев до температуры 1050 °С и выдержка в течении 15 мин.
2. Деформация при температуре 1050 °С со степенью обжатия 20 %.
3. Изотермическая выдержка в течении 20 секунд при температуре 800 °С.
4. Повторная деформация со степенью 5 % при температуре 800 °С.
5. Быстрое охлаждение (закалка).
6. Отпуск при температуре 100, 200, 400 °С в течении 30 минут.

Отпуск закалённых образцов при разных температурах: 100, 200, 400 °С позволил получить более благоприятную структуру, снизив действие неблагоприятного механизма упрочнения σ_r . Контрольная обработка заключалась в отжиге и нормализации стали У8 микролегированной Nb, а так же закалке с отпуском 100, 200, 400 °С стали У8. Для всех видов обработки была выбрана повышенная температура аустенитизации (1050 °С). Данная температура позволила растворить имеющиеся в образцах частицы NbCN, чтобы при последующей обработке выделить их в более дисперсном виде.

Металлографические исследования показали, что проведение термомеханической обработки (со степенью деформации 20 %) при повышенной температуре аустенитизации (1050 °С) размельчает карбиды ниобия с 15 мкм до 200 нм (рис. 2).

аб

Рис. 2. Карбонитриды ниобия, выделенные после:
а – отжига при повышенной температуре аустенитизации;
б – закалки по схеме РТПУ с отпуском 400 °С

На основании данных, полученных в ходе испытаний, построена диаграмма тройной зависимости: предел текучести – ударная вязкость – структура (полученная в ходе различных режимов термической и термопластической обработок) (рис. 3). По диаграмме видно, что оптимальными свойствами обладает структура, полученная в результате осуществления схемы РТПУ с закалкой и отпуском при 400 °С. Данная структура обладает при высоких значениях твёрдости (1800 МПа) и высоким уровнем ударной вязкости (38 Дж/см²). При этом, значение

ударной вязкости данного образца на 30 % превышает значение образца с заведомо пластичной структурой (после отжига).

Данный режим обработки позволил сдвинуть точку X в область структур с оптимальным соотношением прочности и трещиностойкости (точка X' на рис. 3). Это соответствует основным выводам структурной теории, так как данная структура сочетает в себе эффективные механизмы упрочнения – σ_{Φ} (наноразмерные карбонитриды ниобия) и σ_3 (мелкоигольчатый мартенсит).

Рис. 3. Диаграмма тройной зависимости: предел текучести – ударная вязкость – структура для стали У8, микролегированной Nb